

# 地下鉄の温度環境に関する現況と分析

## SITUATION AND ANALYSIS OF THERMAL ENVIRONMENTS IN UNDERGROUND TUNNELS AND STATION PREMISES

大塚 全 一\*  
By Zenichi ŌTSUKA

### 1. ま え が き

地下鉄道はその持っている各種の利点から近代都市に不可欠の施設として、各国、各都市で計画され、建設されつつある。

しかし、地下鉄道は外部との連続性の少ない閉鎖的な空間であるため、騒音と熱の処理については簡単な良い方法が探しにくい。音の点はさておき熱の面を見ていくと、地下鉄のある欧米諸都市に比べ、日本の諸都市は温度、湿度ともに高く、交通需要が増大し、使用電力量が増加するにしたがって、夏季には地下鉄内の不快さが増えていく。日本で一番古い歴史のある帝都高速度交通営団の銀座線で、その主要駅の夏季温度と総発生熱量の年度変化を图示すると、図-1 のとおりで、昭和 20 年には 25°C、昭和 30 年には不快限度(29°C)を越え、昭和 45 年には 33°C に達している。

営団ではこの問題について数年来調査、研究を行い、

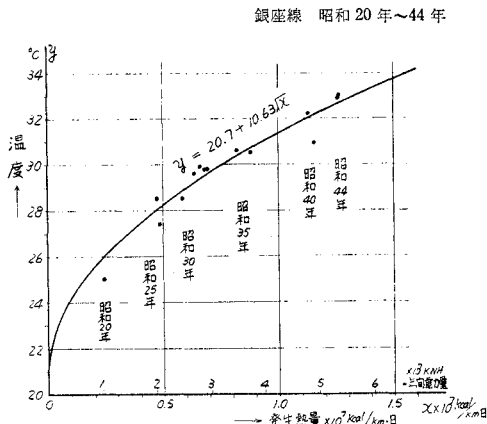


図-1 発生熱量と主要駅夏の温度

各種の対策を検討した結果、銀座線、丸の内線について、駅およびトンネル部の冷房を行い、自然換気式通風口を強制換気式に改造するなどの対策を順次施工中である。

本レポートはこれらの研究のうち、現在まで、地下鉄道内で発生した熱がどのように排出されていたかについて考察したものであり、併せて今後の問題について記述したものである。

### 2. 発生熱量

発生熱源は3つあって、1. は電車運転用電力、2. は照明・換気用の電力、3. は人(138 kcal/h/人)であって、昭和 45 年度では、1. に由来するもの約 70%、2. に由来するもの 16%、3. によるもの約 14% の比率になっていて、この比率はおおむね変わっていない。全発生

表-1 トンネル内の全発生熱量

営業線	軒当り発生熱量 ×10 <sup>6</sup> kcal/日・km	路線の総発生熱量 ×10 <sup>8</sup> kcal/日
銀座線	14.3	178 200
丸の内線	16.6	177 600
荻窪線	7.6	52 400
日比谷線	20.3	214 200
東西線	30.8	286 600
千代田線	15.5	153 000

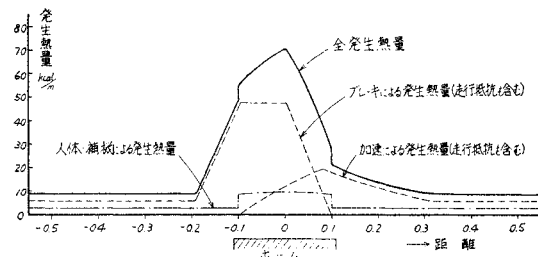


図-2 列車からの発生熱量曲線

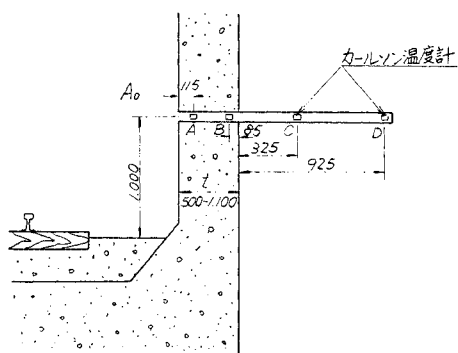
\* 正会員 早稲田大学教授 土木工学科

熱量は表一のとおりであって、図二のごとく駅付近が大きい。

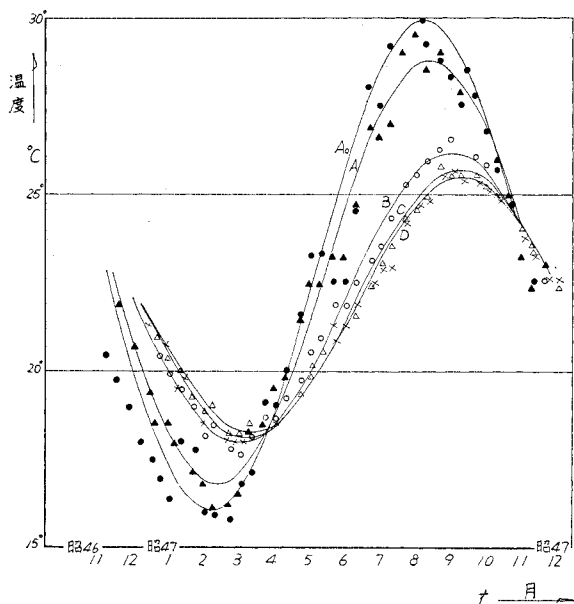
### 3. 熱伝導により流出する熱量

発生熱の一部は熱伝導によりコンクリートから土中に流出し、残部は換気により大気に流出している。このうち熱伝導により流出する熱量がコンクリートや土の温度を上昇させる様子を次のように測定し検討した。

まず駅間のトンネル7か所を選び、図三のようにカールソン温度計を埋め、年間の温度を測定した。7か所のうち日比谷線 12.055 km の測定値を例示すると図四

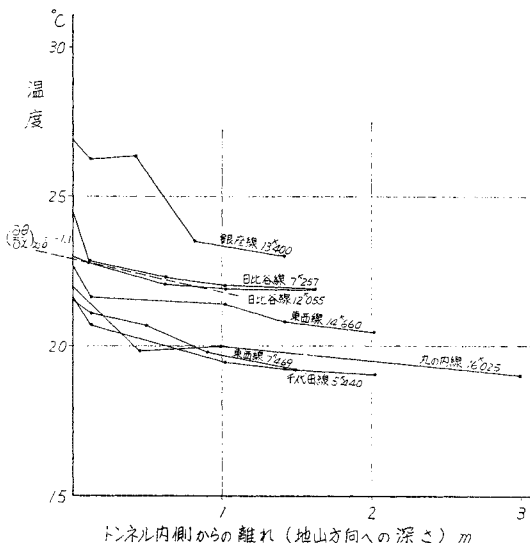


図三 地中温度の測定



測定点	横方向深さ	最高	最低	差	平均	最高温の月	凡例
A	空気	0	29.9	16.1	13.8	23.00	●
A	コンクリート	11.5	28.8	16.9	12.0	22.80	▲
B	コンクリート	61.5	26.2	18.0	8.2	22.10	○
C	土壌	102.5	25.7	18.1	7.6	21.90	△
D	土壌	162.5	25.5	18.3	7.2	21.90	×

図四 日比谷線 12.055 km A 線月別・深さ別温度



図五 年間平均温度の土中分布 (昭和 47 年)

のごとくで、各測定点の温度変化は季節を横軸とした正弦曲線に載っている。そしてトンネルから遠ざかるに従って夏冬の温度差は小さく、年間の平均温度は低くなっている。したがって最高温度を示す時期も深さとともに位相の遅れを示している。図五は前記7か所における土中深さと、年間平均温度の関係を示したものである。熱伝導により流出する熱量は年間を通して

$$Q = A + Bf(t)$$

の形で表わすことができるが、このうち A の部分を仮に定常的、B の部分を周期的に変化する部分として取扱えば、図五は定常的に流出している熱量の影響によるものである。

次に周期的変化について考えて見る。温度  $\theta_0$  の気体が半無限の状態に続いている固体と  $x=0$  で境を接し、 $t$  時間を経過したとき、距離  $x$  における固体の温度を  $\theta$ 、温度伝導率を  $\kappa$  とすれば

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots \dots \dots (1)$$

であり、

$$x=0 \text{ で } \theta = \theta_0 \sin \omega t \dots \dots \dots (2)$$

のような周期変化をするものとして式 (1) を解くと

$$\theta = \theta_0 e^{-x \sqrt{\omega/2\kappa}} \sin \left( \omega t - x \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} \right) \dots \dots \dots (3)$$

となる。式 (3) の前半は深さとともに減衰する温度差であり、後半は位相のずれを示している。したがって温度差と位相から温度伝導率  $\kappa$  を計算することができる。

図四に示した例を式 (3) にあてはめると、図六および図七のようになり

$$\kappa = 0.0016 \text{ m}^2/\text{h} \dots \dots \dots (4)$$

が比較的良好に線に載っていることがわかる。ただしこの場合、コンクリートも土も熱的性質 (比熱、熱伝導率)

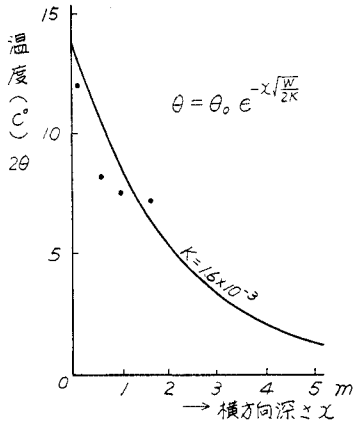


図-6 減衰率による  $\kappa$  の算出 (日比谷線 12.055 km)

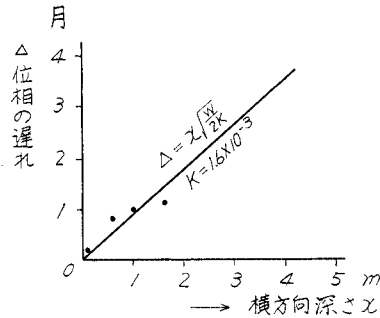


図-7 位相差による  $\kappa$  の算出 (日比谷線 12.055 km)

は等しいとおいている。

次に比熱を  $c$ 、単位重量を  $\rho$  とすると熱伝導率  $\lambda$  は  $\lambda \equiv \kappa \cdot c \cdot \rho$

であり、日比谷線 12.055 km (図-4) の土が  $c = 0.46 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ 、 $\rho = 1.7 \text{ t/m}^3$

であるものとするれば

$$\lambda = 1.3 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \dots \dots \dots (6)$$

となる。

式 (3) の温度変化により、境界面の単位面積から単位時間に固体に流入する熱量は

$$q_{cc} = -\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} \dots \dots \dots (7)$$

であり、一方式 (3) より

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial x} &= \theta_0 \left\{ -\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} e^{-x\sqrt{\omega/2\kappa}} \sin\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \right. \\ &\quad \left. + e^{-x\sqrt{\omega/2\kappa}} \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \right\} \\ &= -\theta_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} e^{-x\sqrt{\omega/2\kappa}} \left\{ \sin\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \right. \\ &\quad \left. + \cos\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}\right) \right\} \end{aligned}$$

となり、境界面では

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} = -\theta_0 \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} (\sin \omega t + \cos \omega t)$$

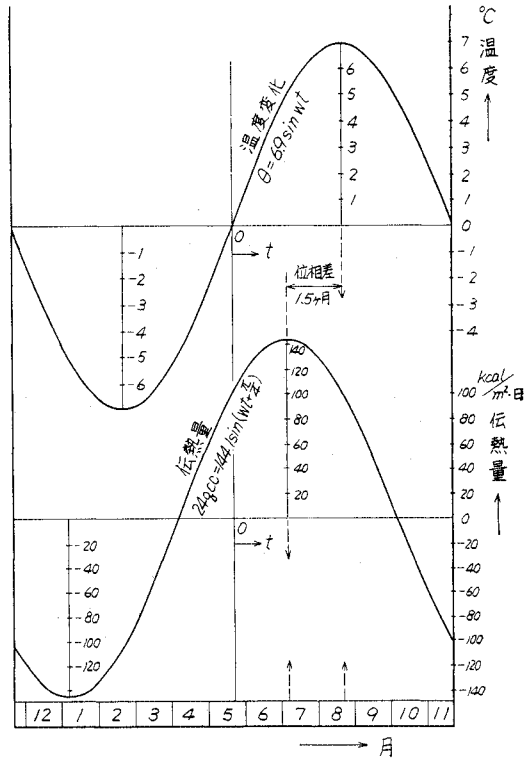


図-8 周期的温度変化による伝熱量

$$= -\theta_0 \sqrt{\frac{\omega}{\kappa}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \dots \dots \dots (8)$$

を得る。したがって式 (7)、(8) より

$$q_{cc} = \lambda \theta_0 \sqrt{\frac{\omega}{\kappa}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \dots \dots \dots (9)$$

式 (9) で表わされる周期的伝熱量は式 (2) で表わされたトンネル内の温度変化より以相が  $\pi/4$  すすんだ周期変化をすることになり、1年間の変化のなかでは1か月半の進みを示して、図-4の温度変化 ( $\theta = 6.9 \sin \omega t$ ) をする場合両者の関係は図-8に示すごとくなる。すなわちトンネル内温度  $\theta$  は2月20日頃一番低く、5月と11月の20日頃平均温度となり、8月20日頃最高となる。一方周期的伝熱量は7月5日頃最大となり、10月と4月の5日頃は0で1月5日頃最小となる。なお式 (4)、(6)、(9) より1日の単位面積当りの伝熱量  $24 q_{cc}$  の概算値を求めると次式のとおりととなる。

$$24 q_{cc} = 144.1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \dots \dots \dots (10)$$

各路線7地点における1日単位面積あたりの周期的伝熱量を計算すると表-2となる。

以上伝熱量の周期的変化について計算を進めてきたが、次に定常的伝熱量を計算する。

$0^\circ\text{C}$  の半無限に続く物体の表面に  $\theta_0^\circ\text{C}$  の温度が加え

表-2 各地点における 1 日 m<sup>2</sup> あたり周期的伝熱量

路線	駅 間	杆 程	θ <sub>0</sub> °C	κ ×10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /h	c kcal/kg°C	ρ ×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	λ kcal/mh°C	24 q <sub>cc</sub> kcal/日・m <sup>2</sup>
銀座線	稲荷町~田原町	13.400	5.00	1.3	0.58	1.5	1.1	98.0 sin(ωt+π/4)
丸の内線	新宿御苑前~新宿三丁目	16.025	7.50	1.0	0.56	1.5	0.8	121.9 "
日比谷線	人形町~茅場町	7.257	7.00	1.3	0.52	1.6	1.1	137.3 "
"	霞ヶ関~神谷町	12.055	6.90	1.6	0.46	1.7	1.3	144.1 "
東西線	神楽坂~飯田橋	7.469	5.95	1.6	0.40	1.9	1.2	114.7 "
"	門前仲町~木場	14.600	6.10	1.6	0.46	1.7	1.3	127.4 "
千代田線	北千住~町谷	5.440	6.15	1.6	0.51	1.6	1.3	128.4 "

られると、物体は徐々に θ<sub>0</sub>°C の温度に近づいていく。物体の表面温度 θ<sub>0</sub>°C を不変とし、表面からの温度変化の影響を受ける厚さを δ とすれば、x > δ の領域が 0°C に保たれているとき、0 ≤ x ≤ δ の領域の温度分布を近似的に次の二次式で表わすものとする

$$\theta = Ax^2 + Bx + C \dots\dots\dots(11)$$

表面条件より

$$x=0 \text{ のとき } \theta = \theta_0$$

$$x=\delta \text{ のとき } \theta = 0, \quad \frac{d\theta}{dx} = 0$$

であり、これを式 (11) に代入すると

$$\theta = \theta_0 \left( \frac{x}{\delta} - 1 \right)^2 \dots\dots\dots(12)$$

上式に含まれる温度の浸透厚さ δ は時間の関数である。

物体の保有エネルギーの変化は絶えず表面から流入する熱量とつり合わなければならない。したがって

$$\frac{d}{dt} \left[ c\rho \int_0^\delta \theta dx \right] = -\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} \dots\dots\dots(13)$$

物体全体に単位時間に入るエネルギー      表面から単位時間に流入するエネルギー

式 (13) より

$$\delta \frac{d\delta}{dt} = 6\kappa$$

これを積分し、かつ t=0 のとき δ=0 であるから

$$\delta = \sqrt{12\kappa t} \dots\dots\dots(14)$$

式 (14) を式 (12) に代入すると

$$\theta = \theta_0 \left( \frac{x}{\sqrt{12\kappa t}} - 1 \right)^2 \dots\dots\dots(15)$$

ただし

$$x \leq \sqrt{12\kappa t}$$

が得られる。

表面 1 m<sup>2</sup> に単位時間に流入する定常的伝熱量は

$$q_{CD} = -\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} \dots\dots\dots(16)$$

である。

図-5 に示した土中年間平均温度の分布は式 (15) に対応するものである。しかしトンネルは半無限の状態ではなく、地下水の流れもあるため、式 (15) のような温度分布をしているとは限らない。そこで、図-5 より  $\left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0}$  を推定し、式 (16) に代入して定常的伝熱量を計算すると表-3 のようになる。

表-3 定常的伝熱量

路線	杆 程 km	$\left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=c}$	λ kcal/mh°C	24 q <sub>CD</sub> kcal/日・m <sup>2</sup>
銀座線	13.400	-2.7	1.1	71
丸の内線	16.025	-1.3	0.8	25
日比谷線	7.257	-1.1	1.1	29
"	12.055	-1.1	1.3	34
東西線	7.469	-1.7	1.2	49
"	14.660	-1.1	1.3	34
千代田線	5.440	-1.7	1.3	53

#### 4. 換気により流出する熱量

トンネルの自然換気は通風口と駅出入口を通して行われている。通風口は大体トンネルの路線に沿って、歩道上に約 100 m 間隔で 3~4 m<sup>2</sup> の開口部を有する形で設けられている。列車のピストンアクションにより換気される量は、列車速度・通風口とトンネルの構造・車両とトンネル内の断面比により差があるが、昭和 46 年に代表的な通風口数か所についてピトー管を使用して測定した結果によると、一列車当り排気 244 m<sup>3</sup>、吸気 268 m<sup>3</sup> を得たので概算値として一通風口一列車当り 250 m<sup>3</sup> の換気量と考えられる。また同年銀座線で駅出入口の換気量を熱線風速計により測定したところ一列車当り 1 500 m<sup>3</sup> を得ている。通風口と駅出入口によりこのような量の換気が行われるものとして、各線の換気量を列車数により計算すると表-4 のとおりになる。

換気により流出する熱量を計算するものとして

Q<sub>V</sub> : 換気により流出する熱量 kcal

V : 換気量 m<sup>3</sup>

i<sub>t</sub> : トンネル空気のエントルピ kcal/kg

i<sub>0</sub> : 大気のエントルピ kcal/kg

(注) 空気のエントルピは 0°C を基準にした空気 1 kg のもの熱量である。湿り空気では、低圧水蒸気のエントルピ (597.3+0.44θ) と乾き空気のエントルピ (0.24θ) の和として表わされる。

とすると

$$Q_V = V \times 1.2 \times (i_t - i_0) \dots\dots\dots(17)$$

ここに空気密度は 1.2 kg/m<sup>3</sup> とする。

トンネル周辺の温度を測定した地点におけるトンネル内空気と大気のエントルピとの差 (i<sub>t</sub>-i<sub>0</sub>) は図-9 であり、6 月の終りないし 7 月の初めを谷とする周期的変化

表-4 換気量

路線	旧列車本数	1km 当り 1日換気量 ×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	1日換気回数
銀座線	696	2.69	74
丸の内線	652	2.38	66
荻窪線	404	1.17	33
日比谷線	532	1.96	43
東西線	494	1.73	32
千代田線	370	1.33	25

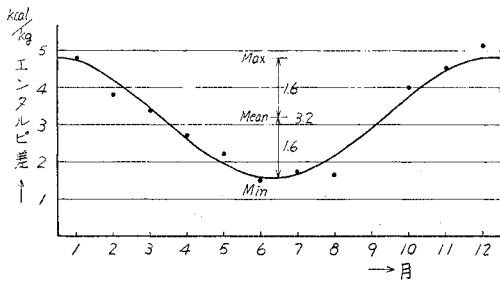


図-9 トンネル内と大気のエントルピー差 (日比谷線 12.055 km)

(正弦曲線)をしていて、伝熱の周期とほとんど同一であることが明らかになった。換気量は毎日一定であるから、換気により流出する熱量も同じ変化をする。

$Q$ (kcal/km・日)を1日にトンネル延長1kmで発生する熱量とすれば

$$Q = Q_{CD} + Q_{CC} + Q_{VD} + Q_{VC} + \Delta Q \dots\dots (18)$$

ここに

$$Q_{CD} = 24 q_{CD}(\text{表-3}) \times U m (\text{トンネル内空周長}) \times 1000 m (\text{延長})$$

伝熱量の定常的部分

$$Q_{CC} = 24 q_{CC}(\text{表-2}) \times U m \times 1000 m$$

伝熱量の周期的変化部分

$Q_{VD}$ : 換気による流出熱量の定常的部分

$Q_{VC}$ : 換気による流出熱量の周期的変化部分

$\Delta Q$ : 1日の熱の授受の結果トンネル1kmに残留する熱量

$\Delta Q$ は次に示すように非常に小さい値である。

$$\Delta Q = C_p \times V \times 1.2 \times \Delta \theta$$

$C_p$ : 比熱 実測により  $C_{p\max} = 0.251 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

$\Delta \theta$ : 温度の1日変化

$$\Delta \theta = \frac{d\theta}{dt} \cdot \Delta t = \frac{d}{dt} \left( 6.9 \sin \frac{2\pi}{365} \cdot t \right) \times \Delta t$$

$t$ : 時間(日で表示)  $\Delta t$ : 1日

$$\Delta \theta_{\max} \approx 0.12$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta Q_{\max} &= 0.251 \times 39.3 \times 10^6 \times 1.2 \times 0.12 \\ &\approx 1.4 \times 10^6 \text{ kcal/km} \cdot \text{日} \end{aligned}$$

式(18)における $Q$ は $10^6$ のオーダーであるが $\Delta Q$ は $10^3$ のオーダーであるから無視することができる。

日比谷線 12.055 km 前後のトンネル 1 km を例にし

て計算をすすめると ( $U=25.7 m$ )

$$\left. \begin{aligned} Q_{CD} &= 34 \times 25.7 \times 1000 = 0.87 \times 10^6 \\ Q_{CC} &= 144.1 \times 25.7 \times 1000 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right) \\ &= 3.70 \times 10^6 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (19)$$

式(18)にて $\Delta Q \approx 0$ とし式(19)を代入すると

$$Q = 0.87 \times 10^6 + 3.70 \times 10^6 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right) + Q_{VD} + Q_{VC} \dots\dots (20)$$

となる。式(20)にて、1日に発生する熱量 $Q$ は一定であるから

$$Q_{VC} = -3.70 \times 10^6 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right) \dots\dots (21)$$

一方、式(17)の $(i_t - i_0)$ は、図-9から定常部分が3.2 kcal/kg、周期的変化部分が1.6 kcal/kgと観察される。したがって式(17)の周期的変化部分をとると

$$Q_{VC} = V \times 1.2 \times (-1.6) \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right) \dots\dots (22)$$

(注)  $Q_{CC}$ に対して逆位相のため符号は負となる。

一方、式(21)、(22)より

$$\text{換気量 } V = 1.93 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{日}$$

よって

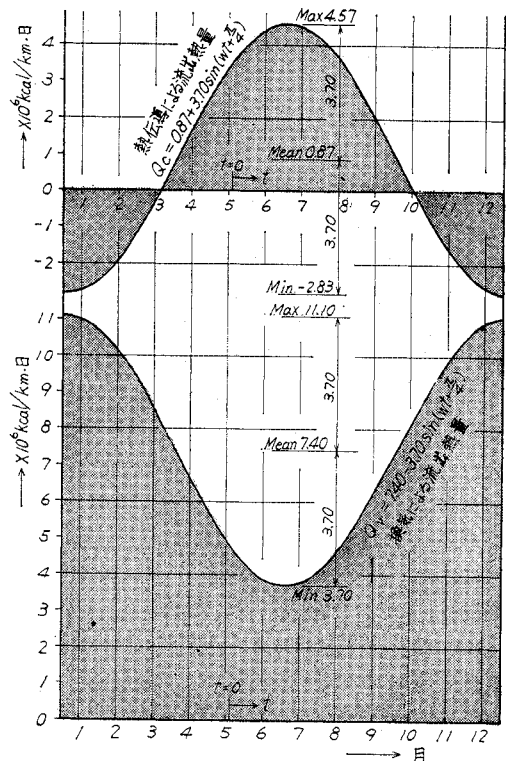


図-10 熱伝導と換気による流出熱量 (日比谷線 12.055 km)

表一5 熱伝導と換気による流出熱量

路線	杆程 km	$i_x - i_a$		熱伝導による流出		換気による流出		換気による流出の割合		
		定常的	周期的	$Q_{CD}$	$Q_{CC}$	$Q_{VD}$	$Q_{VC}$	平均	7月	1月
		kcal/kg		$\times 10^6$ kcal/km・日						$Q_{Vmean}/Q$
銀座線	13.400	4.6	-2.1 sin	1.65	2.28 sin	5.00	-2.28 sin	0.75	0.41	1.09
丸の内線	16.025	2.6	-1.1 sin	0.59	2.89 sin	6.83	-2.89 sin	0.92	0.53	1.31
日比谷線	7.257	3.2	-1.5 sin	0.75	3.52 sin	7.51	-3.52 sin	0.91	0.48	1.33
〃	12.055	3.2	-1.6 sin	0.87	3.70 sin	7.40	-3.70 sin	0.89	0.45	1.34
東西線	7.469	3.4	-1.6 sin	1.50	3.53 sin	7.50	-3.53 sin	0.83	0.44	1.11
〃	14.660	3.4	-2.2 sin	1.29	4.83 sin	7.47	-4.83 sin	0.85	0.30	1.40
千代田線	5.440	3.9	-2.0 sin	1.63	3.94 sin	7.68	-3.94 sin	0.82	0.40	1.25

表一6 流出熱量と換気量

路線	杆程 km	流出熱量	路線平均の発生熱量	該地点の換気量	路線平均の換気量	該地点の換気量
		$Q = Q_C + Q_V$ $\times 10^6$ kcal/km・日	$\times 10^6$ kcal/km・日	$\times 10^6$ m <sup>3</sup> /km・日	$\times 10^6$ m <sup>3</sup> /km・日	該地点の換気量 kmあたり通風口数
銀座線	13.400	6.65	12.46	0.90	2.69	3
丸の内線	16.025	7.42	10.70	2.19	2.38	15
日比谷線	7.257	8.26	10.55	1.96	1.96	13
〃	12.055	8.27	〃	1.93	〃	15
東西線	7.469	9.00	9.31	1.84	1.73	強制換気
〃	14.660	8.76	〃	1.83	〃	〃
千代田線	5.440	9.31	9.87	1.65	1.33	〃

$$Q_{VD} = 1.93 \times 10^6 \times 1.2 \times 3.2$$

$$= 7.40 \times 10^6 \text{ kcal/km} \cdot \text{日}$$

以上計算の結果は図一10となる。なお各路線7地点で計算を行った結果は表一5のごとくで、流出熱量・路線平均の発生熱量・換気量および路線平均の換気量の比較を表一6に示す。

### 5. 熱の放散

熱伝導により流出する熱量は7月と1月の月上旬にそれぞれ最大値と最小値を示す周期変化をしている。これはトンネル内温度が8月と2月の中旬に最大・最小となる周期的変化(正弦曲線)をするのに対し、伝熱量は45°位相が進んだ周期的変化をするためである。駅間のトンネルの7地点で見ると、定常的伝熱量が0.59~1.65×10<sup>6</sup> kcal/km・日であるのに、周期的伝熱量はその振幅が2.28~4.83×10<sup>6</sup> kcal/km・日と非常に大きい。このため7月初めの最大値は3.48~6.12×10<sup>6</sup> kcal/km・日と非常に大きくなり、1月初めの最小値は-0.63~0.354×10<sup>6</sup> kcal/km・日となって、逆に土壌からトンネル内へ熱が流入する。

換気により流出する熱量もまた周期的変化をする。トンネル内で発生する熱量は毎日一定量であるから、換気による流出熱量の周期的変化部分は、伝熱量の周期的変化部分と振幅が同じで逆位相となる。そしてこの換気による流出熱量は、大気とトンネル内空気のエンタルピの差に比例し、これは図一9に示すように7月初めを谷とする正弦曲線によく載っている。すなわち伝熱量の周期

変化の逆位相となっている。

換気による流出熱量は非常に大きなもので、定常的部分が5.0~7.68×10<sup>6</sup> kcal/km・日であり、最小値でも負になることはない。すなわち全放散熱量の75~92%が換気により流出する熱量である(表一5)。そして残りが伝熱により流出する熱量である。これを7月初めについて調べると、換気による流出熱量は30~53%であり、伝熱による流出熱量が47~70%である。従来伝熱による流出熱量は20~30%といわれていた。なるほど定常部分1年間の平均値をとればそのとおりであるが、7月、8月には伝熱量が非常に大きくなるのがわかった。

調査点7か所における流出熱量は各路線の平均値(発生熱量の大きい駅を含む全延長)に比べいくぶん小さめになっているし、換気量は銀座線13.4kmを除き路線平均値とほぼ同程度である(表一6参照)。

場所別に見ると銀座線13.4kmは通風口が1km当り3か所と他に比べ少なく、その換気量は他地点の半分以下である。したがって換気による流出熱量は小さく、逆に伝熱量が大きい。また流出熱量の総和は路線平均値の約50%である。

一方、丸の内線、日比谷線の3地点は1km当りの通風口数が13~15か所あり、換気量は路線平均値とほぼ等しい。そして流出熱量は路線平均値の70~80%で温度も銀座線に比べ低い。

東西線、千代田線の3地点は強制換気が行われているため、路線の平均値に比べ換気量は大きく、流出熱量は90%以上である。したがって熱の処理能力が高く、開業後経過年月が浅いこと相まって温度は低くなっている。

### 6. 対策について

熱量の最大発生源は列車運転用電力によるものである。従来の電車は、牽引力やスピードのみを追って、電力の節約や熱の発生を考慮することはあまり行われなかったが、最近になって半導体の制御器により発車時の余

剰電力を切り、制動時の発生電力を再生使用する回生ブレーキ付サイリスタ・チョッパ方式が導入されている。貴重なエネルギーを抵抗器により熱変換して放散し、その熱の処理のため冷房を行うという悪循環は、新設線で繰返すことのないよう十分配慮しなければならないが、既設線では冷房を考える以外にとりあえずの対策はない。このため営団では主要な駅とトンネルの冷房化を進めているが、その建設費、維持管理費は大きなものである。

冷房・換気の施設は営業後建設するのは難しい。したがって路線建設時に将来を見越した空調計画を策定する必要がある。最近の地下鉄はシールド工法が大半を占め、また開削工法であっても共同溝などのために通風口が設置できないので、大部分が強制換気を行うことになる。営団では新線の換気回数を、衛生面などから1時間に10回と定めているが、前述のごとく換気により運び出される熱量は非常に大きなものであり、回数を増せばさらに効果は上る。

換気は量の増加とともに質の向上を図る必要がある。電車が駅に持ち込む熱量は一旦拡散し、空気とともに排出されるが、ホーム下に吸気口を設け、電車の抵抗器付近の熱を直接排出するのはもっとも効果がある。また夜間の換気は効率の良い方法であり、これらを総合した熱の排出のための効率のよい換気システムを計画していかなければならない。

冷房や換気を行う場合、冷却塔、換気塔、機械室を設けるのはもちろん、駅ではダクト、熱交換器をおさめる空間が必要である。ホーム下あるいは天井にこれら施設を収容する計画はすべて建設時に配慮しなければならない。ホームやコンコースの天井は施設保守に必要な高さをとるとともに、スラブの構造と適切なものになければならない。

全然別の発想であるかも知れないが、トンネルの縦断勾配を施工と建設費の面からでなく、エネルギーの有効利用の観点からも検討することが必要であるかも知れない。

恒久的に地下鉄の温度環境を保つことは、輸送需要が増大を続けていく限り非常に困難であり、対策としては換気のシステム化と駅およびトンネル冷房に頼らざるを得なくなっているのが現状である。将来の輸送需要に見合った大量輸送のための交通網が整備され、トンネル内の発生熱量を一定限界以内に押えられて、“夏涼しく冬暖かい”地下鉄が実現することを望んでやまないものである。

#### 参考文献

- 1) 帝都高速度交通営団高温高湿研究会資料、昭 46。
- 2) 空気調査・衛生工学便覧、昭 42。
- 3) 東京都の気候。
- 4) 伝熱概論(甲藤好郎著)。
- 5) 東京地盤図。

(1974.10.29・受付)